

530,854

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international(43) Date de la publication internationale
29 avril 2004 (29.04.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/036288 A2(51) Classification internationale des brevets⁷ : **G02F**(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2003/050089(22) Date de dépôt international :
14 octobre 2003 (14.10.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/12925 17 octobre 2002 (17.10.2002) FR(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-
MISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE [FR/FR];
31/33, rue de la Fédération, F-75752 PARIS 15ème (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :

GRANGEAT, Pierre [FR/FR]; 136 allée des Vignes
du Persan, F-38330 SAINT-ISMIER (FR). **RODET,**
Thomas [FR/FR]; La Perrière Saint Martin, F-01680
LHUIS (FR). **DESBAT, Laurent** [FR/FR]; 2 Grande Rue,
F-38000 GRENOBLE (FR).(74) Mandataire : **LEHU, Jean**; C/O Brevatome, 3, rue du
Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

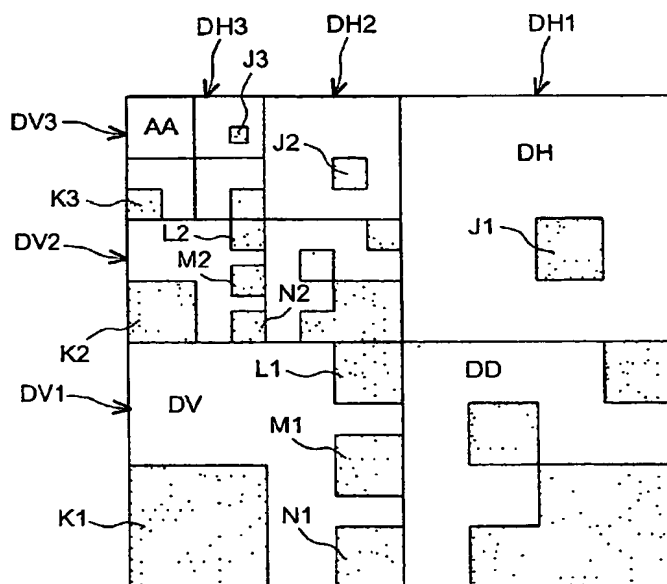
(81) État désigné (national) : US.

(84) États désignés (régional) : brevet européen (AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE,
IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR RECONSTRUCTING AN IMAGE FROM A SET OF PROJECTIONS BY APPLYING A WAVELET
TRANSFORM(54) Titre : PROCÉDE DE RECONSTRUCTION D'UNE IMAGE A PARTIR D'UN JEU DE PROJECTIONS PAR APPLICA-
TION D'UNE TRANSFORMÉE EN ONDELETTE.

(57) Abstract: The invention concerns a tomographic image reconstruction computation involving the breakdown of two-dimensional sets of projections of said image by a wavelet decomposition method, wherein the set of projections is separated into pictures expressing respectively the set and the details at a higher frequency of the projections. The reconstruction is performed separately on the pictures before any combination is achieved. Some properties of said decomposition, in particular in the Fourier frequency domain, enable substantial reduction of the amount of computations.

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/036288 A2



En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) Abrégé : Un calcul de reconstruction d'images en tomographie implique la décomposition de jeux bidimensionnels de projections de cette image par une méthode de décomposition en ondelette, dans laquelle le jeu de projections est séparé en imagerie exprimant respectivement l'ensemble et les détails à plus haute fréquence des projections. La reconstruction s'effectue séparément sur les imagerie avant qu'une combinaison ne soit faite. Certaines propriétés de cette décomposition, notamment dans le domaine fréquentiel de Fourier, permettent de réduire sensiblement la quantité de calculs.

**PROCEDE DE RECONSTRUCTION D'UNE IMAGE A PARTIR D'UN JEU
DE PROJECTIONS PAR APPLICATION D'UNE TRANSFORMEE EN
ONDELETTE**

5

DESCRIPTION

Le sujet de cette invention est un procédé de reconstruction d'une image à partir de jeux de projections de cette image et en appliquant une transformation en ondelette.

10

Les procédés de tomographie consistent à examiner un objet inanimé ou un être vivant par un réseau de détecteurs mobiles qui prend une série de vues en tournant autour de lui. Ces vues sont des projections de la propriété permettant d'exprimer l'image (normalement une absorption d'un rayonnement traversant l'objet ou une scintillation d'un corps radioactif ingéré par l'objet), c'est-à-dire des sommes de la propriété le long de lignes traversant l'objet et définies par la collimation des détecteurs. Chaque

15 détecteur mesure une projection de l'image à chaque vue. Quand un nombre suffisant de vues et de projections a été pris, on procède à l'inversion des résultats pour obtenir la valeur de la propriété à chaque point de l'objet ; cette inversion est

20 comparable à l'inversion d'un système d'équations de grandes dimensions et peut s'effectuer ouvertement par des méthodes algébriques, ou, plus fréquemment, par des méthodes analytiques par lesquelles on applique des opérations numériques successives aux projections sans

25 inverser directement le système. Un grand nombre de méthodes existent, parmi lesquelles on citera celle qui

30

est décrite dans le brevet français 2 615 619 qui est le premier de cette équipe de recherche, et le brevet français 2 810 141 plus récent qui présente quelques ressemblances avec le procédé qui sera décrit ici. On
5 peut aussi citer un article de Grass paru dans Phy. Med.Biol, vol.45, p.329, février 2000. Ces opérations aboutissent à ce qu'on appelle la rétroprojection des mesures, c'est-à-dire au calcul de la valeur de la propriété prise à chacun des points de la ligne de la
10 projection.

Il peut être avantageux de travailler avec des résultats exprimés dans le domaine fréquentiel de Fourier, comme le prouve le deuxième document. Des transformées numériques d'autre nature ont aussi été
15 employées.

On se reportera aux figures 6, 7 et 8 pour une description concrète et schématique d'un procédé de prise de mesures tomographiques. Une source F de rayonnement et un système de détection 3 sont mobiles
20 le long d'un cadre annulaire 2 à des positions diamétralement opposées, et un rayonnement conique originaire de la source F atteint le système de détection 3 après avoir traversé l'objet 1 à étudier. La pièce essentielle du système de détection 3 est un
25 réseau 4 bidimensionnel de détecteurs 5. Des projections R de l'image tridimensionnelle de l'objet 1 sont mesurées par ceux des détecteurs 5 qui sont inclus dans un pourtour 15 de l'"ombre" de l'objet 1. Un nombre important de vues de ce genre est pris à autant
30 d'angles θ différents d'orientation du réseau 4 des détecteurs 5. Il est fréquemment considéré,

conventionnellement pour les calculs, un réseau fictif 4' de détecteurs 5' sur un plan de détection Pdet qui est parallèle au réseau 4 réel et passe par le centre O du cadre 2. Des coordonnées p et q sont définies pour
5 identifier les détecteurs 13 d'après leurs lignes et leurs colonnes. Des calculs de réarrangement, courants dans l'art, permettent de transposer les mesures d'un réseau 4 quelconque au réseau fictif 4' et d'appliquer les algorithmes de reconstruction à celui-ci.

10 Le brevet français 2 615 619 sera rappelé ici puisqu'il expliquait en détail quelles opérations numériques, notamment celles qui sont dites de filtrage et de rétroprojection, permettent d'obtenir l'image de l'objet à partir de ses projections ; des méthodes
15 différentes existent cependant.

Le problème auquel on s'attaque ici est la réduction du temps ou du volume des calculs pour inverser le système des mesures.

On sait qu'il s'agit d'une des limitations
20 les plus graves dans les procédés de tomographie, et de nombreux procédés nouveaux ont été conçus pour le même objectif que l'invention, dont celui du deuxième brevet cité.

L'idée exposée ici est d'exploiter les
25 propriétés particulières d'une transformée numérique, dite décomposition en ondelette, des projections pour prévoir des emplacements de projections négligeables ou insignifiantes et de ne pas appliquer les calculs d'inversion à ces emplacements. Des perfectionnements
30 offrent encore une plus grande réduction des calculs.

Sous sa forme la plus générale, l'invention concerne un procédé de reconstruction d'une image à partir de jeux de projections de cette image, comprenant successivement :

- 5 - une série de décompositions successives des jeux de projections en ondelette donnant des imasettes des jeux des projections, comprenant des images d'une approximation (AA) et des séries successives (Dd, Dh, Dv) de détails homologues de
10 chaque jeu,
 - dans chacune des séries et successivement pour des imasettes de détails ayant un nombre croissant de points, une recherche de portions insignifiantes jugées pour dépourvues de contenu, et une recherche de
15 portions homothétiques des portions insignifiantes dans chacune des imasettes de détails qui suivent dans la série ;
 - des rétroprojections des imasettes des jeux de protection en imasettes de l'image à
20 reconstruire, avec une omission des rétroprojections pour toutes les portions insignifiantes et toutes les portions homothétiques.
 - et une combinaison des imasettes à reconstruire par une inversion de décomposition donnant
25 ladite image.

L'ordre des étapes (surtout les rétroprojections précédant la recombposition) est essentiel pour obtenir les avantages de l'invention.

L'art antérieur comprend un exemple de
30 reconstruction d'une image par une décomposition en ondelette (US - 5 953 388 - A), qui cependant est

appliquée là pour reconstruire une portion seulement de l'image, en exploitant la propriété de "localité" de la décomposition, qui n'est guère sensible aux autres portions de l'image, qu'on peut ainsi négliger dans les calculs. Le brevet US-5 841 890-A traite d'un sujet analogue et considère divers aspects de la décomposition en ondelette appliquée à la tomographie. La décomposition ne sert pas à accélérer des calculs de rétroprojection pour obtenir une image d'ensemble de façon plus économe en calculs.

On doit enfin mentionner le document US-6 148 110-A qui décrit un procédé à masques numériques analogue à celui de l'invention, mais seulement pour comprimer un signal d'image sans calcul de rétroprojection.

L'invention sera maintenant décrite plus concrètement et complètement en liaison aux figures suivantes :

- la figure 1 illustre une décomposition d'image en ondelette,
- les figures 2, 3 et 4 illustrent certains aspects de l'invention,
- la figure 5 illustre un organigramme résumant une réalisation complète du procédé,
- la figure 6 illustre un dispositif de principe du procédé,
- et les figures 7 et 8 illustrent plus en détail le procédé et certaines rotations employées.

Nous commencerons par exposer la transformation d'un signal par une décomposition en ondelette. Plusieurs modèles d'ondelettes existent, qui

ont en commun d'être comparables à un filtre passe-bas. Le signal est séparé en deux portions dont l'une, associée aux basses fréquences, peut être tenue pour une approximation du signal, alors que l'autre, associée aux hautes fréquences, exprime plutôt ses détails. Une propriété des ondelettes est que les portions peuvent contenir chacun une moitié des points du signal si bien qu'il n'y a pas de perte d'information par cette décomposition. La décomposition peut être faite dans le domaine direct d'expression du signal ou dans le domaine de Fourier.

Dans le cas de projections d'un objet examiné sur un réseau généralement bidimensionnel de détecteurs, les projections peuvent être groupées en jeux bidimensionnels d'après deux de leur coordonnées (en général p et q sur les axes d'un réseau de détecteurs). Toutefois, comme la figure 8 l'illustre, on considère le plus souvent des jeux de projections réarrangées sur un réseau fictif de détecteurs. Dans l'exemple de la figure 8, on regroupe des projections R_x originaires d'un certain nombre de positions F_x successives de la source F du rayonnement, de manière que les projections aboutissant à une même colonne (à q constant) de détecteurs 5' du réseau fictif 4' soient originaires d'une même position F_x , et aussi que les plans de projections soient tous parallèles jusqu'aux positions F_x : on a alors transformé le problème d'une géométrie conique du rayonnement à une géométrie en éventails parallèles dont la résolution est plus simple. De plus, le réseau fictif 4' passe par le centre 0 de

rotation et appartient donc au plan de détection P_{det} , ce qui facilite aussi les calculs.

L'invention pourrait encore être appliquée à des reconstructions de coupes de l'objet 1 à l'aide d'un réseau monodimensionnel de détecteurs (tous à la même coordonnée p). On pourrait encore appliquer le principe exposé ci-dessus du réarrangement des projections d'une géométrie en éventail plan à géométrie parallèle.

Le traitement des mesures réarrangées se fait en suivant les lignes de détecteurs 5 du réseau fictif 4', successivement pour tous les points.

Un signal peut être décomposé successivement en ondelette pour donner plusieurs niveaux de résultats. Les nouvelles décompositions ne concernent que la portion de l'ondelette qui donnait l'approximation du signal, la portion ou les portions qui donnaient les détails étant préservées.

Prenons comme exemple d'objet d'une décomposition en ondelette une image formée de cinq cercles dont un cercle extérieur et quatre cercles de diamètres différents, tous inscrits dans le premier. L'image de départ comprenait $n \times n$ points, et si on applique deux fois une décomposition en ondelette de cette image selon le principe précédent, le résultat est donné à la figure 1.

La décomposition en ondelettes de l'image donne un ensemble d'imagettes, dont trois sont plus importantes que les autres, comprenant $n/2 \times n/2$ points chacune, et correspondent aux détails horizontaux, aux détails diagonaux et aux détails verticaux de l'image

de départ à grande échelle ; elles sont notées respectivement Dh1, Dd1 et Dv1. Les détails horizontaux de l'image sont obtenus à partir des projections d'angles θ proche de 0 ou π , les détails verticaux à partir des projections d'angles θ proche de $\pi/2$ ou $3\pi/2$, et les détails diagonaux à partir des projections d'angles intermédiaires avec les conventions de la figure 1. Le reste de l'image est composé de quatre imagerettes comprenant $n/4 \times n/4$ points chacune et dont trois sont des imagerettes de détails horizontaux, diagonaux et verticaux à plus petite échelle, notées Dh2, Dd2 et Dv2, alors que la dernière imagerette est une approximation notée AA de l'image de départ. Si on appelle ϕ et ψ les fonctions de décomposition d'une image ou d'une imagerette en ondelette, la fonction ϕ donnant l'approximation et la fonction ψ les détails, les fonctions à appliquer à l'image de départ pour obtenir la décomposition de la figure 1 sont données par le tableau I.

20	AA : $\phi(x_1) \phi(x_2) \phi(\frac{x_1}{2}) \phi(\frac{x_2}{2})$
	Dv2 : $\phi(x_1) \phi(x_2) \phi(\frac{x_1}{2}) \psi(\frac{x_2}{2})$,
	Dd2 : $\phi(x_1) \phi(x_2) \psi(\frac{x_1}{2}) \psi(\frac{x_2}{2})$,
	Dh2 : $\phi(x_1) \phi(x_2) \psi(\frac{x_1}{2}) \phi(\frac{x_2}{2})$
	Dv1 : $\phi(x_1) \psi(x_2)$
25	Dd1 : $\psi(x_1) \psi(x_2)$
	Dh1 : $\psi(x_1) \phi(x_2)$

L'invention consiste à effectuer la rétroprojection sur chacune des imagerettes des jeux de

projections décomposées en ondelette et à combiner les imageries rétroprojetées par une inversion de la disposition en ondelette pour obtenir l'image recherchée. La décomposition en ondelettes est propice
5 à diverses simplifications qui accélèrent beaucoup les calculs. Ces simplifications sont faites entre la décomposition et la combinaison.

La première d'entre elles concerne des filiations qu'on peut établir entre des détails
10 homologues à des échelles différentes. On considère pour cela des séries d'imageries donnant des détails de même nature. La figure 2 (qui illustre une décomposition d'une image ressemblant à celle de la figure 1, mais à trois niveaux de décomposition)
15 illustre, pour les trois imageries des détails horizontaux Dh1, Dh2 et Dh3, des portions homologues J1, J2 et J3 qui occupent la même position et la même superficie relative sur chacune de ces imageries et se déduisent ainsi l'une de l'autre par une homothétie
20 géométrique dans leurs imageries.

On peut faire l'hypothèse que, pour la plupart des images rencontrées en pratique (à l'exception notamment des images texturées), si une portion telle que J3 a un contenu insignifiant,
25 c'est-à-dire qui ne révèle rien par rapport aux valeurs significatives de l'imagerie, les portions homologues à plus grande échelle, ici J2 et J1, seront elles aussi insignifiantes.

Conformément à l'invention, on commence
30 donc, pour les imageries des détails, à rétroprojeter les détails à l'échelle la plus petite, puis les

détails aux échelles de plus en plus grandes. Un seuil numérique est appliqué aux coefficients de l'ondelette, c'est-à-dire aux valeurs que prend la transformée dans l'imagette considérée. Une valeur inférieure à ce seuil
5 donne une portion insignifiante, telle que J3. Cependant, les portions insignifiantes des imagettes ne sont pas reconstruites, c'est-à-dire que les calculs de rétroprojection ne sont pas effectués pour elles.

On procède concrètement en construisant un
10 masque numérique avant de rétroprojeter l'imagette. Sur les détails horizontaux Dh, le masque est construit pour la première fois pour l'imagette Dh3. Il prend une valeur égale à 0 pour les portions insignifiantes telles que J3 et égale à 1 ailleurs. Les coefficients
15 du masque se suivent dans un ordre déterminé, par exemple ligne après ligne. Les calculs de rétroprojection sont appliqués sur l'imagette considérée dans l'ordre des coefficients du masque. Quand un coefficient est égal à 0, aucun calcul n'est
20 effectué pour le point correspondant de l'imagette, auquel on attribue une valeur nulle dans l'imagette rétroprojectée.

En abordant l'image suivante des détails horizontaux (Dh2), le masque numérique permet de ne pas
25 considérer la portion J2, dont les points ne sont pas traités par l'unité de calcul qui effectue la rétroprojection. Si par exemple le masque de l'imagette Dh3 possède un coefficient nul à la ligne i et la colonne j, on prévoit que les quatre points des lignes
30 2i et 2i+1, et des colonnes 2j et 2j+1 de l'imagette Dh2 auront aussi des valeurs insignifiantes. Les

calculs de rétroprojection ne seront pas effectués pour ces points.

Un masque numérique est ainsi construit pour chaque niveau de décomposition. Le masque décrivant l'imagette Dh2 comprendra par convention des coefficients égaux à 0 pour toute portion homologue à une portion aux coefficients nuls (comme J3) du masque de l'imagette correspondante à plus petite échelle ; pour déterminer les valeurs 1 ou 0 des autres points du masque de Dh2, on utilisera encore les comparaisons avec le seuil conventionnel. D'autres portions insignifiantes, ayant des valeurs nulles de masque, pourront apparaître. C'est ce qu'on a illustré sur les imagettes Dv1, Dv2 et Dv3, des décompositions successives des détails verticaux. L'imagette Dv3 comprend une portion insignifiante K3 dont on retrouve les homologues K2 et K1 sur les décompositions à plus grande échelle. L'imagette Dv3 ne comprend, dans cet exemple, aucune autre portion insignifiante, mais il a été possible d'en trouver trois autres, notées L2, M2 et N2, sur l'imagette suivante Dv2. Au niveau de décomposition à plus grande échelle, celui de l'imagette Dv1, on ne s'occupera pas de rétroprojecter les points situés aux portions L1, M1 et N1 homologues de L2, M2 et N2.

On va maintenant examiner d'autres particularités du procédé de l'invention favorables, à une accélération des calculs.

La première repose sur l'égalité entre la transformée de Fourier d'une projection de l'image à un

angle fixé et la transformée de Fourier de l'image sur une droite de même angle passant par l'origine.

En se reportant à la figure 3, où un jeu de projections à été converti dans le domaine de Fourier pour donner des projections de nature fréquentielle dans le système d'axes notés ζ_1 et ζ_2 , le support du jeu de projection dans le domaine de Fourier comprend les valeurs comprises entre $-v_0$ et v_0 pour ζ_1 comme pour ζ_2 . Une décomposition en ondelette, comme celle de la figure 1, fait apparaître l'approximation encore notée AA dans les fréquences les plus basses, autour de l'origine $\zeta_1 = \zeta_2 = 0$, alors que les détails se trouvent de part et d'autre de cette approximation, à des fréquences de plus en plus grandes pour les détails à grande échelle.

On a représenté une droite passant par l'origine, en faisant un angle θ avec l'axe horizontal ζ_1 . Cette droite traverse l'approximation AA, ainsi que les imagerie des détails verticaux Dv1 et Dv2. Mais on est assuré que les projections faisant cet angle θ seront tout à fait inutiles pour les calculs de rétroprojection des détails diagonaux Dd et horizontaux Dh puisque la droite d'angle θ passe à l'écart de leurs imagerie. L'application de l'invention comprend alors une sélection, pour chacune des catégories d'imagerie, des angles de projections qui seront utilisés dans les calculs. Le calcul sur le support des projections est élémentaire.

La figure 4 reprend la division d'une image décomposée en ondelette et transposée dans le domaine

de Fourier. Une reconstruction parfaite peut être obtenue avec l'emploi d'un nombre déterminé de projections, dépendant de la fréquence (discrétisation) de reconstruction de l'image de l'objet. Ainsi, pour
5 reconstruire l'approximation AA, on peut démontrer qu'il suffira de choisir un nombre de projections, parmi celles qui ont été faites, correspondant à une fréquence maximale v_1 servant de rayon à un cercle circonscrivant la représentation fréquentielle de
10 l'approximation AA dans la décomposition. De même, les détails à petite échelle seront complètement rendus en utilisant un nombre de projections correspondant à la fréquence v_2 dans le cercle ayant ce rayon, dans le système d'axes ζ_1 , ζ_2 , et circonscrivant les
15 représentations fréquentielles du groupe de détails Dv_2 , Dd_2 et Dh_2 à même échelle. Le support des projections dans le domaine de Fourier permet donc de connaître aisément les fréquences maximales nécessaires pour la rétroprojection parfaite des imagerie
20 respectives.

La mise en œuvre de l'invention pour exploiter ces deux particularités comprendra donc, à la rétroprojection de chacune des imagerie, une sélection des projections utiles pour cette rétroprojection, en
25 écartant les autres ; et éventuellement une restriction du nombre de projections utiles effectivement exploitées par le calcul pour n'en garder que le nombre utile.

La figure 5 est un organigramme de
30 l'ensemble du procédé décrit ici.

REVENDICATIONS

1. Procédé de reconstruction d'une image à partir de jeux de projections de cette image, comprenant
5 successivement :

- une série de décompositions successives des jeux de projections en ondelette donnant des imageries des jeux des projections, comprenant des images d'une approximation (AA) et des séries
10 successives (Dd, Dh, Dv) de détails homologues de chaque jeu,

- dans chacune des séries et successivement pour des imageries de détails ayant un nombre croissant de points, une recherche de portions insignifiantes
15 jugées pour dépourvues de contenu, et une recherche de portions homothétiques des portions insignifiantes dans chacune des imageries de détails qui suivent dans la série ;

- des rétroprojections des imageries des
20 jeux de protection en imageries de l'image à reconstruire, avec une omission des rétroprojections pour toutes les portions insignifiantes et toutes les portions homothétiques,

- et une combinaison des imageries à
25 reconstruire par une inversion de décomposition donnant ladite image.

2. Procédé de reconstruction d'une image suivant la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend une sélection de régions d'angles (θ) des jeux de
30 projections qui sont utilisés dans les rétroprojections.

3. Procédé de reconstruction d'une image suivant la revendication 2, caractérisé en ce qu'il comprend une sélection d'un nombre de projections qui sont utilisées dans la rétroprojections.

5 4. Procédé de reconstruction d'une image suivant la revendication 2, caractérisé en ce que la sélection des régions d'angle est réalisée en fonction d'un support d'une transformée de Fourier des jeux de projections décomposés en ondelette.

10 5. Procédé de reconstruction d'une image suivant la revendication 3, caractérisé en ce que la sélection du nombre de projections est réalisée en fonction de fréquences maximales d'un support d'une transformée de Fourier des jeux de projection décomposés en ondelette.

1 / 7.

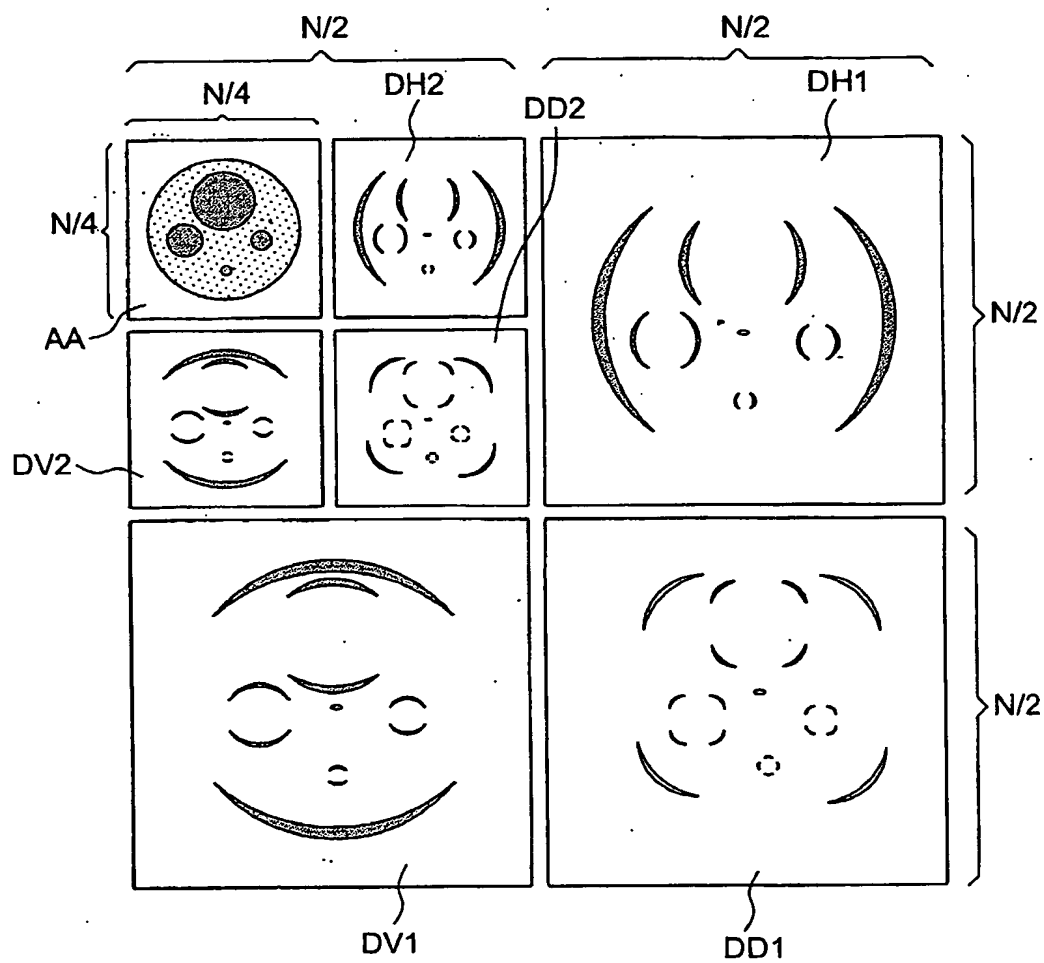


FIG. 1

2 / 7

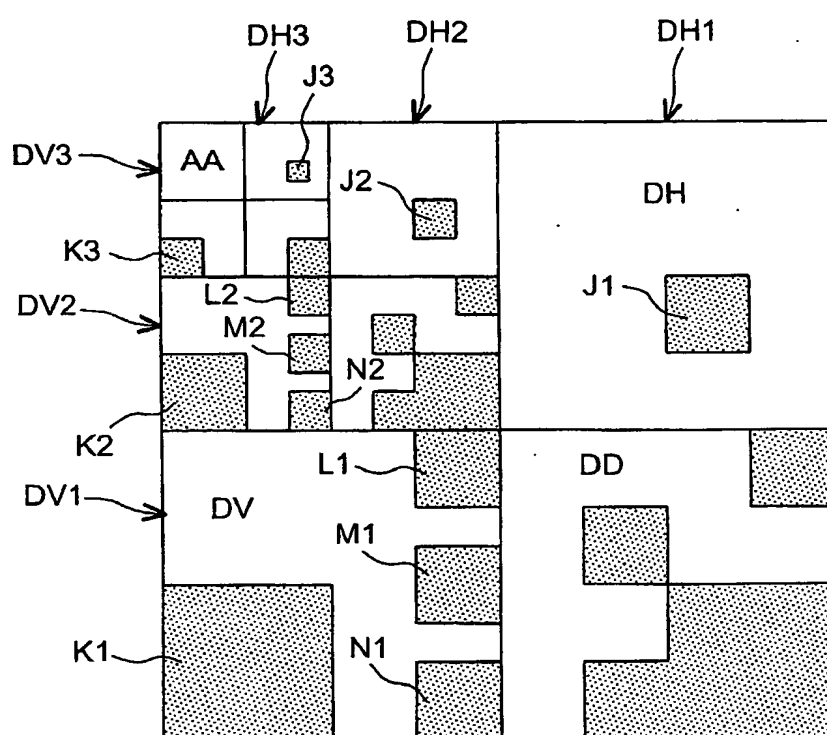


FIG. 2

3 / 7

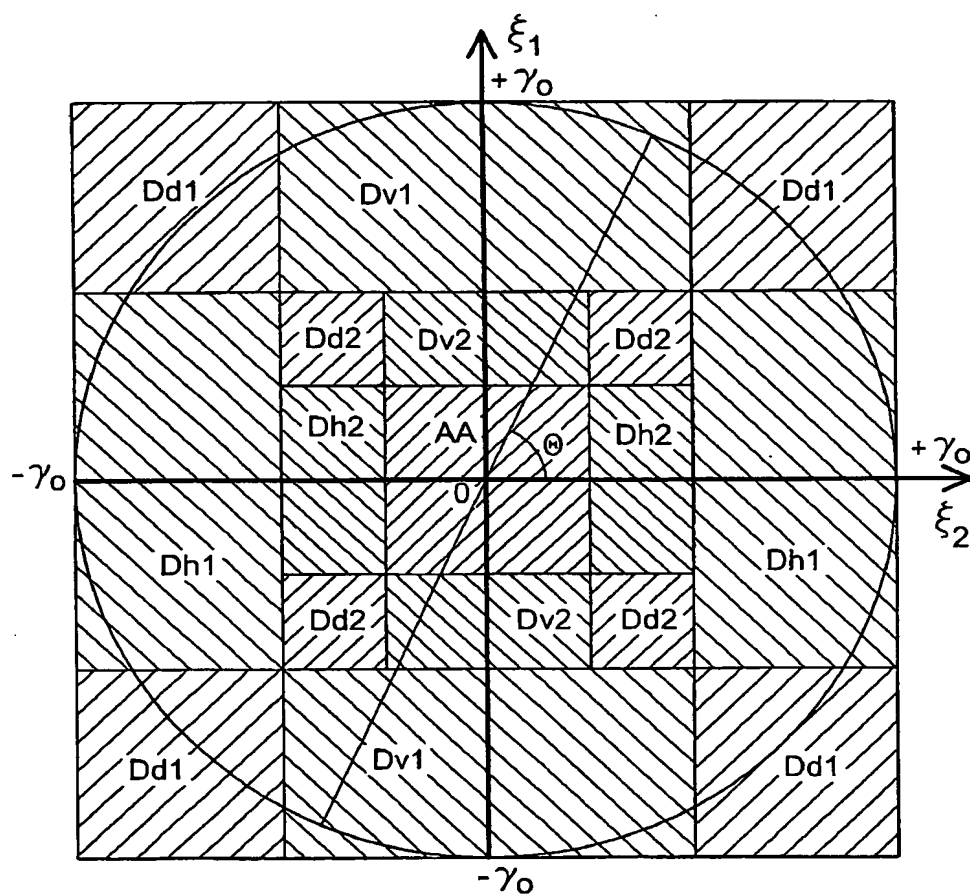


FIG. 3

4 / 7

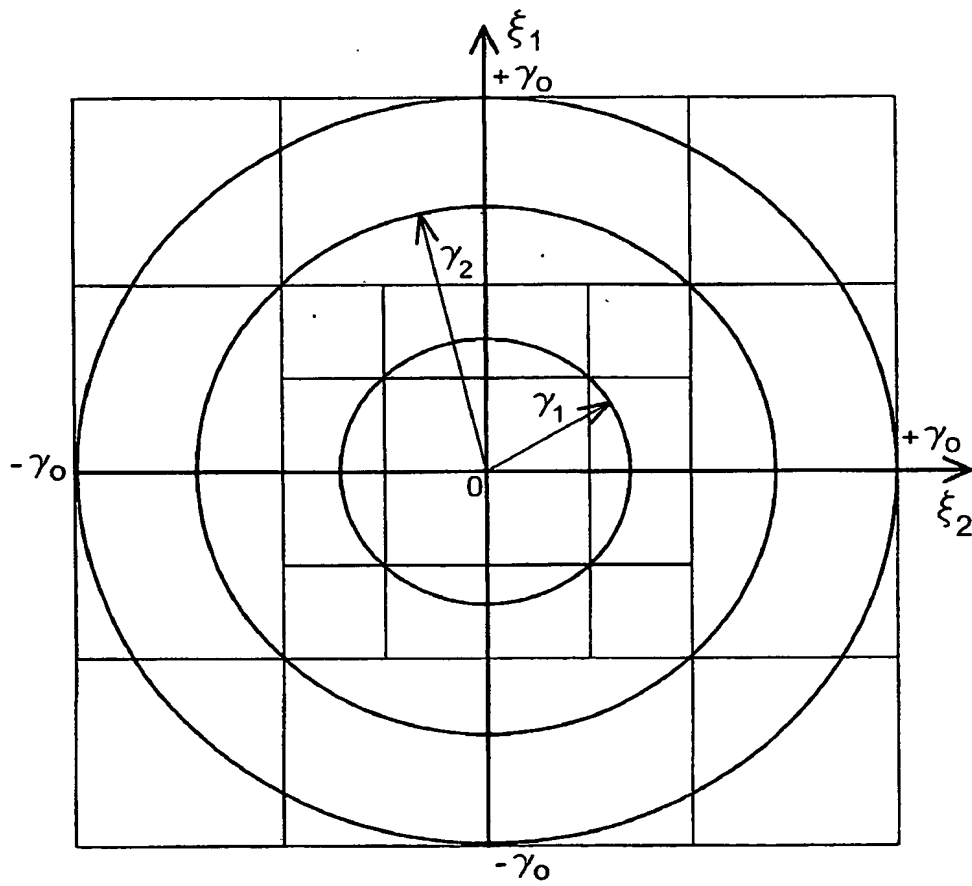


FIG. 4

5 / 7

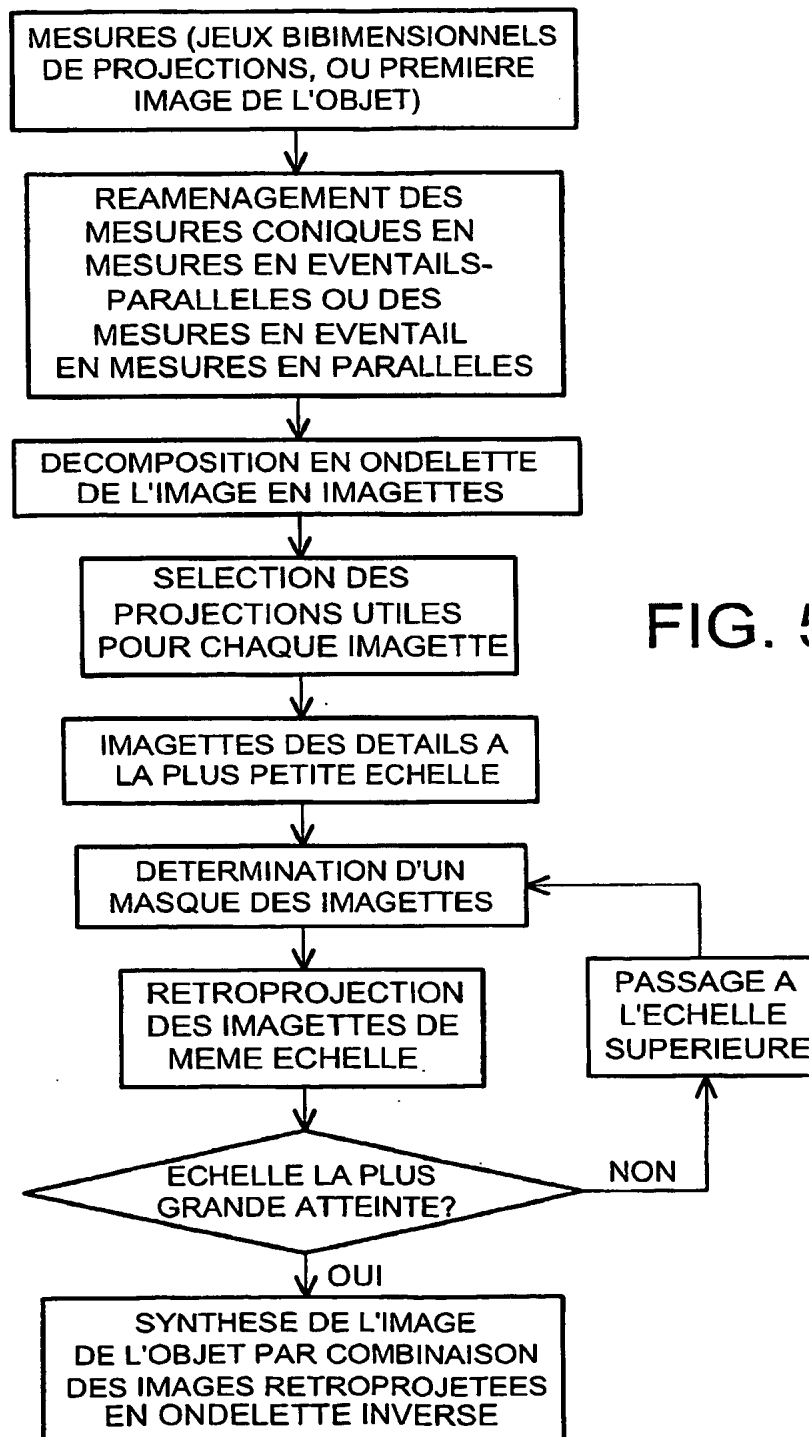
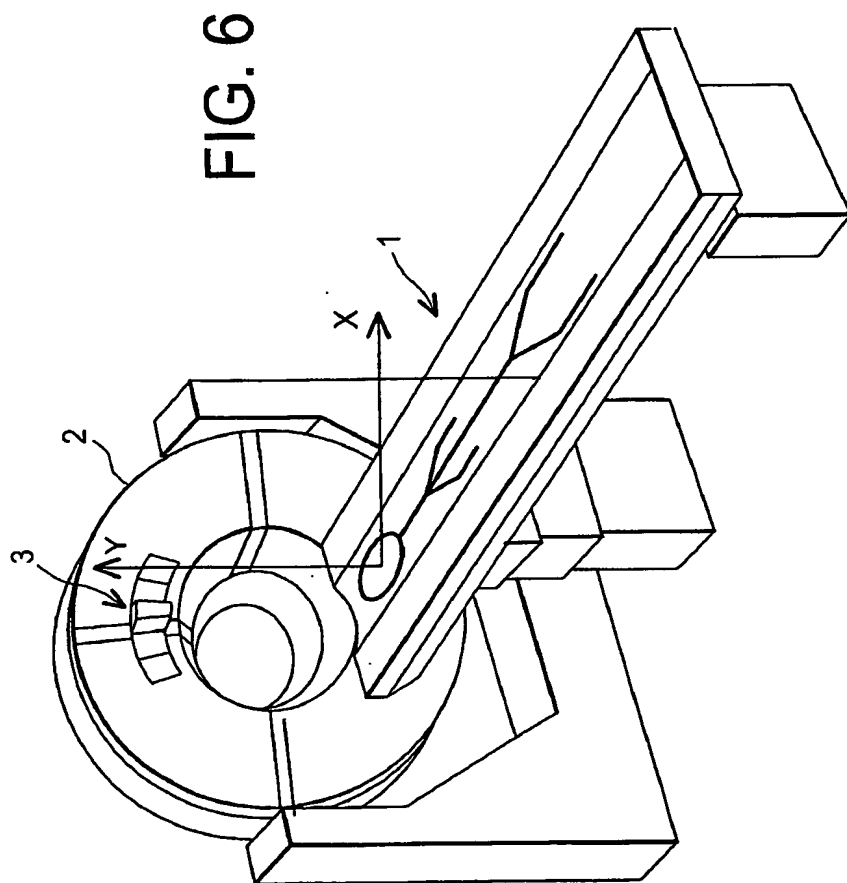


FIG. 5

6 / 7



7/7

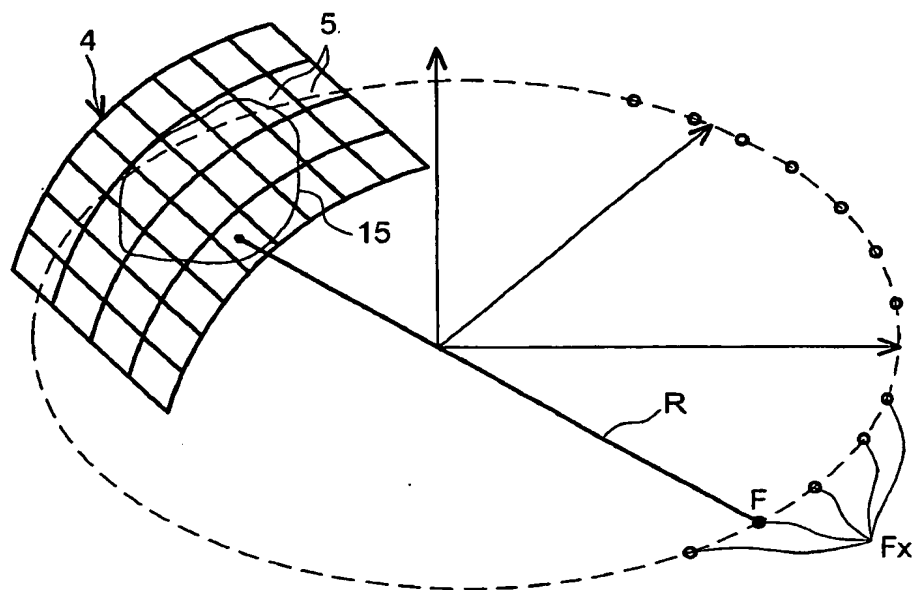


FIG. 7

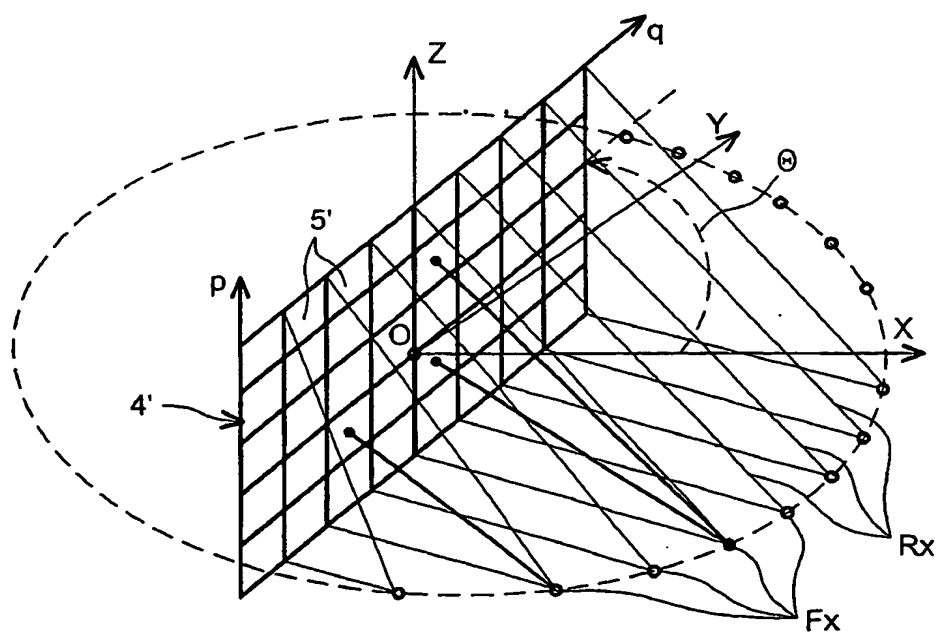


FIG. 8